

VU Research Portal

Tectonic and climatic forcing in Quaternary landscape evolution in the central Pannonian Basin: A quantitative geomorphological, geochronological and structural analysis

Ruszkiczay-Rudiger, Z.

2007

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Ruszkiczay-Rudiger, Z. (2007). *Tectonic and climatic forcing in Quaternary landscape evolution in the central Pannonian Basin: A quantitative geomorphological, geochronological and structural analysis*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

VRIJE UNIVERSITEIT

**TECTONIC AND CLIMATIC FORCING IN QUATERNARY LANDSCAPE EVOLUTION IN
THE CENTRAL PANNONIAN BASIN:
A QUANTITATIVE, GEOMORPHOLOGICAL, GEOCHRONOLOGICAL AND
STRUCTURAL ANALYSIS**

ACADEMISCH PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van de graad Doctor aan
de Vrije Universiteit Amsterdam,
op gezag van de rector magnificus
prof.dr. L.M. Bouter,
in het openbaar te verdedigen
ten overstaan van de promotiecommissie
van de faculteit der Aard- en Levenswetenschappen
op donderdag 1 februari 2007 om 10.45 uur
in de aula van de universiteit,
De Boelelaan 1105

door

Zsófia Ruskiczay-Rüdiger
geboren te Boedapest, Hongarije

promotoren: prof.dr. P.A.M. Andriessen
 dr. E. Horváth

copromotoren: dr. L. Fodor
 dr. G. Bada

The ten thousand-mile journey also starts with a single step.

/Chinese proverb/

The research reported in this Thesis has been carried out at:

Department of Isotope Geochemistry
Faculty of Earth and Life Sciences
Vrije Universiteit
De Boelelaan 1085
1081 HV Amsterdam
The Netherlands

and

Department of Physical Geography
Institute of Geography and Earth Sciences
Eötvös University
Pázmány Péter sétány 1/c
1117, Budapest
Hungary

This research was funded by the EUROBASIN Marie Curie Fellowship of the EU, by the Hungarian state PhD scholarship, by the Hungarian National Scientific Found (OTKA T029798, OTKA F043715), and by the Netherlands Centre for Integrated Solid Earth Sciences (ISES).

Reading committee:

dr. Ronald van Balen
dr. Manfred Frechen
dr. Anne Cornelis Lankreijer
dr. Liviu Mațenco
dr. Annamária Nádor

© Zs. Ruszkiczay-Rüdiger, 2007

ISBN: 978-963-06-1674-4

CONTENTS

ACKNOWLEDGEMENTS	3
SUMMARY	5
SAMENVATTING	7
ÖSSZEFOGLALÁS	9
CHAPTER 1: INTRODUCTION	11
1.1. Scope of the thesis	11
1.2. Multidisciplinary approach in modern Quaternary research	11
1.3. The study area	13
1.4. Outline of the thesis and brief methodology	15
CHAPTER 2: STRUCTURAL AND LANDSCAPE EVOLUTION OF THE PANNONIAN BASIN	16
2.1. Location and major structural units of the Pannonian Basin	16
2.2. Neogene structural evolution as a framework for neotectonic studies	17
2.3. Neotectonic setting	19
2.4. Neogene climate and landscape evolution	22
2.5. Quaternary climate and geochronology	22
2.5.1. Quaternary climate oscillations and surface processes	24
2.6. Plio-Quaternary sedimentation and main geomorphological features	27
2.7. Plio-Quaternary drainage pattern evolution	29
CHAPTER 3: QUANTIFICATION OF QUATERNARY VERTICAL MOVEMENTS ALONG THE DANUBE VALLEY: REVIEW OF CHRONOLOGICAL DATA	32
3.1. River terraces: tools for the quantification of vertical movements	32
3.2. Climate or tectonic controlled incision?	33
3.3. Threefold longitudinal division of the Danube valley in the HMR	34
3.4. The “traditional” terrace chronology	40
3.5. Quantification of existing terrace data	45
3.6. Incision rate based on Th/U dating of speleothems	48
3.7. New data on the terrace at Basaharc	50
3.8. Discussion and conclusions	51
CHAPTER 4: PRINCIPLES OF EXPOSURE AGE DETERMINATION USING TERRESTRIAL IN SITU PRODUCED COSMOGENIC NUCLIDES (TCN)	54
4.1. TCN in landscape evolution studies	54
4.2. Production of TCN	55
4.3. Stable and radioactive isotopes	57
4.4. Scaling factors for TCN production	58
4.5. Subsurface production of cosmogenic nuclides	61
4.6. TCN production on partially shielded, on inclined and on eroding surfaces	62
4.7. Effects of erosion and temporal shielding	63
4.8. Selection of the adequate TCN	64
4.9. Error considerations	66

CHAPTER 5: ³ He EXPOSURE AGE DATING OF STRATH TERRACES IN THE DANUBE BEND.....	68
5.1. Dating assumptions.....	68
5.2. Sampling strategy.....	68
5.3. Sample preparation	72
5.4. Measurement.....	73
5.5. Analytical results and discussion	75
5.6. Climatic vs. tectonic control on terrace formation	77
5.7. “Traditional” ages and ³ He concentrations as erosion rates: possibility of another scenario?	78
5.8. Conclusions.....	78
CHAPTER 6: DEM-BASED MORPHOMETRY, MORPHOTECTONICS AND QUATERNARY SURFACE PROCESSES OF THE GÖDÖLLŐ HILLS	80
6.1. Methodology	80
6.2. Geology of the Gödöllő Hills	81
6.3. Quaternary sedimentation, field observations and geomorphic mapping	82
6.4. Morphometric analysis.....	92
6.4.1. Geomorphological segmentation of the study area	93
6.4.2. Hypsometry.....	96
6.4.3. Derivation of the drainage network.....	98
6.4.4. Characteristic features of the drainage network	100
6.4.5. Longitudinal valley profiles	104
6.5. Discussion	107
CHAPTER 7: NEOTECTONICS AND LANDSCAPE EVOLUTION OF THE GÖDÖLLŐ HILLS	113
7.1. Methodology and structural data sources.....	113
7.2. Seismic image of the main geologic formations	114
7.3. Pre-neotectonic structural evolution.....	114
7.4. Neotectonic structural evolution	117
7.5. Neotectonic deformation pattern in the light of surface morphology.....	119
7.6. Conclusions: Quaternary landscape evolution of the Gödöllő Hills	121
CHAPTER 8: SYNTHESIS - NEOTECTONICS AND LANDSCAPE EVOLUTION OF THE CENTRAL PANNONIAN BASIN	126
8.1. Quaternary incision of the Danube – uplift of the Hungarian Mountain Range.....	126
8.2. Morphostructural evolution of the Gödöllő Hills.....	128
8.3. Timing of neotectonic deformation in the Central Pannonian Basin	130
8.4. Climatic vs. tectonic control on Quaternary landscape evolution	130
8.5. Final remarks and considerations for future research.....	131
REFERENCES	132

ACKNOWLEDGEMENTS

During the sixth semester of my MSc education an agile bearded man gave us a lecture about neotectonics in the framework of the subject of Quaternary Research. This was the first time I met László Fodor and neotectonics, which proved to be definitive for my future. During the preparation of this multidisciplinary thesis I enjoyed the possibility of acquiring enormous amount of knowledge, and I feel honoured that so many people spared their time on my scientific education by explanations and discussions or simply by providing me a proper reference. Sitting down to compose this section, as a foreword for the outcome of several years of work, lots of faces come to my mind, who all helped my work in some way or other. Without them this thesis would not exist in its present form.

I begin with my supervisors, Paul Andriessen, Erzsébet Horváth, László Fodor and Gábor Bada. I am obliged to Paul for receiving me in the Department of Isotope Geochemistry in the VU, where I met exceptional professional expertise and human atmosphere during my stays. Thank you for your efforts in organising my defence at the VU, which turned out to be a pretty challenging task. Special thanks for the translation of the Dutch summary of my thesis. Erzsi, thanks for your help, support and encouragement in all stages of my research well as in personal matters. I'm grateful for your generosity and cheerful personality, it was pleasure to work with you. My dearest thanks are offered to László, who introduced me into the mystery of structural geology and neotectonics and whose personality and animation always gave me fresh impetus for work. Laci, thank you for the thorough explanations, for the brainstorming discussions and for widening my scope of thinking. I enjoyed working with you from fieldwork to data interpretation. I am indebted to Gábor for opening a gateway towards the international field of earth sciences by finding me scholarships for my research at the VU. Thanks Gábor, for your "push" through your comments and advice, as well as for helping in improving my writing style. Your criticism contributed a lot to the quality of my work. I'm also grateful for the efforts, which You and Laci made in introducing me into the secrets of wines, though I'm afraid, I could not come up to your expectations.

I feel deeply indebted to Tibor Dunai, who should have appeared among the supervisors as without his guidance, the cosmogenic part of this thesis would not exist. Thank you Tibor, for your essential guidance from sampling to the data analysis. I appreciate a lot your work on our samples in the noble gas lab.

This work largely benefited from the comments and advice of the members of the reading committee: Annamária Nádor, Manfred Frechen, Liviu Mațenco, Anco Lankreijer and Ronald van Balen. I highly appreciate that you spent your precious time on contributions to improve the quality of my manuscript. Anco, special thanks for your readiness in helping the administrative part both of my stays and my defence at the VU.

Gábor, Laci, Anco, Tibor, and Liviu, thank you for your kindness and hospitality, during my stays in Amsterdam.

I'm grateful to Gyula Gábris, Sierd Cloetingh and Ferenc Horváth for supporting my PhD studies and research.

It was a pleasure to work in the mineral separation lab under the guidance of Roel von Elsas. Thanks a lot Roel, for the cute, tiny "vacuum needle" you invented to assist the patience-demanding task of handpicking; without it I would still be struggling with my pyroxene "monsters" under the microscope. Hearing you singing in Hungarian in the lab always cheered me up.

During the preparation of chapter 6 I received essential information and helpful comments from Tamás Telbisz, who introduced me into the practical aspects of the DEM analysis and

know-how of the ArcView software. Nicholas Pinter helped a lot in improving the quality the manuscript of this chapter. I would like to express my deep gratitude to them.

I'm indebted to Gábor Windhoffer, who was a great company during my stay in Amsterdam and as well in discussing questions of tectonics, as resolving the sometimes really tricky task of printing our posters at the VU or discussing about questions of daily life. Windy, we planned to make our defences together; this book will always remind me to the grievous loss that you are not among us any more.

Jan Wijbrans is thanked for showing me the Ar/Ar measurement and age calculation procedure, despite the fact that this was not part of my research program. The same goes for Martin Konert, who kindly helped me in the sedimentology lab at the VU and for Jürgen Foeken for lending me a hand with understanding the noble gas measurement process. I'm obliged to Sándor Józsa for familiarizing me with a basic knowledge on micro-mineral recognition and separation.

I appreciate the help and support of Gábor Csillag, Ferenc Síkhegyi, Zoltán Unger and Károly Németh from the Geological Institute of Hungary and of Gábor Timár, Gábor Molnár and Mátyás Márton from the ELTE.

I'd like to express my gratitude to Dávid Karátson and Balázs Székely for our fruitful discussions and work together. I am much obliged to Balázs Bradák for his endless energy and for the fun during our work together and to Zoltán Kern for being my exceptional, unfortunately ex-office-mate at the ELTE. Joaquim Juez-Larré was my office-mate during my first stay in Amsterdam. Thanks a lot Joaquim, for being a good company and for helping me through the complications of daily life at the VU. I also feel gratitude for Diana Necea, who I shared my office with for only a month during my last stay at the VU. I enjoyed our talks, both scientific and personal. My colleagues in the Department of Physical Geography at the ELTE – László Mari, Barnabás Korbély, Zsolt Mattányi and Balázs Kohán, András Sík, Balázs Nagy – are thanked for their assistance in solving day-by-day difficulties, computer repairs or anything else. The same goes for people – during my stay – at the VU Karen Leever, Karin Boessenkool, Barbara Carrapa, Glen Murrel, Pieter van Heiningen.

I acknowledge the administrative work of Fenny Bosse, Erika Marik and Éva Pacsirszky.

Company of my friends brought some colour into the sometimes monotonous days (months-years) of work. Thanks for the meetings, excursions, home slide shows and chatting together. Special thanks to Gábor Szalkai, for being my best e-friend both in hard and good times.

I'm grateful to my Mum and family for their endless support and love.

Balázs, nem nagyon tudom, hogy köszönhetném meg (azért igyekezni fogok ☺), hogy mindig mellettem voltál, szerettél, segítettél és elviseltél akkor is, amikor ez nem lehetett nagyon könnyű.

**TECTONIC AND CLIMATIC FORCING IN QUATERNARY LANDSCAPE EVOLUTION
IN THE CENTRAL PANNONIAN BASIN:
A QUANTITATIVE, GEOMORPHOLOGICAL, GEOCHRONOLOGICAL AND STRUCTURAL
ANALYSIS**

SUMMARY

Landscape evolution is the result of the interaction between tectonics, trying to create topography and climate driven surface processes, intending to destroy it. The development of new techniques in age determination of landforms, definition of rates of erosion and crustal movements together with quantitative measurement and comparison of landscape features opened a new epoch in Quaternary research. This thesis presents a quantitative multidisciplinary approach of the Quaternary landscape evolution of the Central Pannonian Basin.

The first study area was the Danube valley, where incision of the river could keep pace with the uplift of the Hungarian Mountain Range (HMR). The Danube is the only river cutting through the HMR, offering a unique opportunity to determine its uplift rate via incision rates derived from terrace chronology.

In the Danube valley, a thorough revision of existing terrace-chronological data enabled the calculation of differential incision rates along the river. Several contradictions were recognized between new, absolute age data and the “traditional” terrace system based mostly on geomorphology and relative ages. Calculated incision rates for the last ~350 ka were ~0.2 mm/y at the flanks of the HMR (Buda and Gerecse Hills), and 0.4 mm/y in its axial zone, the Danube Bend. In the latter area no reliable age data were available about the terrace ages, “traditional” chronology based almost exclusively on geomorphologic considerations.

Terrestrial in situ produced cosmogenic ^3He exposure age dating of uncovered strath surfaces in the Danube Bend provided an incision rate 4 times higher than the rate derived from earlier data sets. The maximal uplift rate of 1.6 mm/y was calculated by the ^3He terrace ages for the last ~270 ka, considering the likely effect of some erosion of the strath surfaces after abandonment by the river. This rate is comparable with Quaternary incision/uplift rates in actively deforming parts of the Alpine collisional zone and it is behind the rates published for the Himalayan and West Pacific regions of most intensive tectonic warping. The ^3He study suggests that the formation of the antecedent Danube valley started during the middle Pleistocene in contrast with the early Pleistocene age suggested by the “traditional” terrace chronology. Steep topography with moderate elevation in the Danube Bend respective to areas of similar uplift rates could be a consequence of the young age of structural inversion in the Central Pannonian Basin and resulting relatively recent onset of the uplift or its gradual acceleration towards present.

Periodic changes of river style are the consequence of negative and positive deviation of the rivers from their state of equilibrium by the coupling of Quaternary climate oscillations and tectonic uplift. Resolution and accuracy of the terrace data proved to be insufficient to link terrace formation to certain climate phases.

The other research area, the Gödöllő Hills, is the northeastern part of the rolling hilly region between the uplifting HMR and the subsiding Great Hungarian Plain (GHP). Here, the thick upper Miocene-Pliocene sedimentary cover enabled to combine a DEM-based morphometric study with a structural analysis using seismic reflection profiles. This methodology allowed the determination of the style and timing of neotectonic deformation of the Central Pannonian Basin and to assess its influence on Quaternary landscape evolution.

The morphotectonic analysis revealed that large-scale NW-SE trending rectilinear features are landforms of deflatory origin. The two ridges, classified as yardangs and a wind channel in between were formed with no apparent structural control. Fluvial processes in the wind channel were limited, but on the wind-shielded surface of the ridges phases loess- and paleosol development and fluvial incision occurred. Regional tilt from the HMR towards the GHP led to the development of a dominant SE directed runoff. Similar orientation of the deflation due to the prevailing NW wind may explain the century old debate in Hungarian geosciences about the role of deflation and fluvial erosion in landscape development of the area.

Differences in surface roughness and drainage density developed only partly due to differential relative uplift. Deflation caused severe surface denudation and smoothing in the wind channel, while fluvial incision dissected the surface on the ridges where overall lowering was smaller. Drainage anomalies, such as deviations from the consequent SE flow direction in the form of intra valley drainage divides, river deflections, radial and centripetal drainage networks, developed as surface expressions of neotectonic deformation of the upper Miocene - Pliocene strata. Inverse reactivation of earlier normal faults and transpression along a former transtensional strike-slip zone, the Tápió-Tóalmás Zone (*TaTZ*), caused structural warping of even the uppermost imaged horizons.

Seismic reflection profiles suggest that neotectonic inversion started in the area in early Pliocene times (~4 Ma). Geometry of the deformation pattern allow for a compressional stress-field with NE-SW maximal horizontal stress axis for the neotectonic phase.

It is proposed here that the NW-SE wind channel of the Gödöllő Hills is the easternmost member of the fan shaped Transdanubian “meridional” valley set. The WSW-ENE trending deflected valleys, which follow en echelon segments of the *TaTZ* (Alsó-Tápió, Kókai Creeks) are considered as continuations of the Transdanubian “longitudinal” valley set. Present analysis disproves structural preformation of the “meridional” valleys and suggests that in the transitional zone between the HMR and GHP large-scale landforms developed by joint effect of fold tectonics and wind erosion. Fluvial erosion prevailed on the wind-shielded ridges and flow directions adjusted to the folded pattern of the subsurface layers.

This quantitative morphotectonic study suggests that there is a considerable delay between the onset of the neotectonic phase in the area during the Pliocene (~4 Ma) and the development of surface features in response to the deformation from the middle Pleistocene onwards. Most probably, during late Pliocene - early Pleistocene times climate controlled denudation mostly erased surface expressions of the deformation. Middle to late Pleistocene climate change could alter the style of erosion. This, together with an acceleration of vertical motions towards present, may have caused that denudation could not keep pace with deformation any longer. An increase of compressional stresses in the inverting Central Pannonian Basin, the accommodation zone between the convergent Northeastern and Western Units of the Pannonian lithosphere, may have led to an acceleration of vertical motions in the second part of the Quaternary.

**TEKTONISCHE EN KLIMATOLOGISCHE KRACHTEN BIJ DE LANDSCHAPSEVOLUTIE
IN HET CENTRAAL PANNOONSE BEKKEN TIJDENS HET KWARTAIR:
EEN KWANTITATIEVE, GEOMORFOLOGISCHE, GEOCHRONOLOGISCHE EN STRUKTURELE
ANALYSE**

SAMENVATTING

De vorming van een landschap is het resultaat van de wisselwerking tussen tektonische processen, die topografie opbouwen, en klimaat gedreven oppervlakte processen, die topografie afbreken. De ontwikkeling van nieuwe technieken voor de bepaling van ouderdommen van oppervlakten, erosie snelheden, kwantitatieve metingen van bewegingen van de korst en vergelijking van landschap markeringen, betekenden een nieuw tijdperk in het onderzoek van het Kwartair. In dit proefschrift wordt een kwantitatieve multidisciplinaire benadering gegeven over landschapsevolutie van het Centraal Pannoonse Bekken tijdens het Kwartair.

Het eerste studie gebied is het Danube dal, waar insnijding van de rivier gelijke tred hield met de opheffing van het Hungarian Mountain Range (HMR). De Danube is de enige rivier die het HMR doorsnijdt en biedt daardoor een unieke gelegenheid de opheffingssnelheid te bepalen door middel van insnijdingssnelheden verkregen uit de chronologie van de terrassen.

Een grondige revisie van de bestaande chronologie van de terrassen maakte het mogelijk om in het Danube dal gedifferentieerde insnijdingssnelheden op verschillende plaatsen te berekenen. De nieuwe absolute ouderdommen brengen verscheidene tegenstellingen aan het licht ten opzichte van de 'traditionele' terras systematiek, die hoofdzakelijk gebaseerd was op geomorfologie en relatieve ouderdommen. De berekende insnijdingssnelheden voor de afgelopen ~ 350 duizend jaar bedragen ~ 0.2 mm/jaar voor de flanken van HMR (Buda en Gerecse Hills), en 0.4 mm/jaar voor de axiale zone, de Danube Bend. In de axiale zone waren geen betrouwbare ouderdommen van terrassen beschikbaar, en de 'traditionele' chronologie was bijna uitsluitend gebaseerd op geomorfologische overwegingen.

Cosmogene ^3He ouderdomsbepalingen van onbedekt gesteente aan het oppervlak in de Danube Bend leverden een insnijdingssnelheid op die 4 maal hoger is dan de snelheid die is verkregen met de bestaande data-set! De berekende maximale opheffingssnelheid uit de ^3He ouderdommen van de terrassen bedraagt 1.6 mm/jaar voor de afgelopen tijdsperiode van ~ 270 duizend jaar, waarbij rekening is gehouden met het waarschijnlijke effect dat een geringe mate aan erosie optreedt nadat de rivier niet meer in het dal stroomt. Deze snelheid is vergelijkbaar met insnijdings/opheffingssnelheden in het Kwartair in gebieden die actief vervormen in alpine botsingszones en is lager dan snelheden die gepubliceerd zijn voor de meest actieve zones in het Himalaya gebergte en West-Pacifische regio's. De ^3He studie suggereert dat de oorsprong van de Danube in Midden Pleistoceen ligt en niet in Vroeg Pleistoceen, zoals werd verondersteld op grond van de 'traditionele' terras chronologie. Steile topografie met moderate hoogte in de Danube Bend en gebieden met vergelijkbare opheffingssnelheden zouden het gevolg kunnen zijn van de recente strukturele inversie in het centraal Pannoonse bekken en het resultaat van het relatief recente begin van opheffing of de geleidelijke versnelling ervan naar het heden toe.

Periodieke veranderingen in de rivierloop zijn het gevolg van negatieve en positieve afwijkingen van de evenwichtstoestand, tot stand gebracht door het gekoppelde systeem van klimaat schommelingen in het Kwartair en tektonische opheffing. De resolutie en nauwkeurigheid van terras gegevens blijken onvoldoende te zijn om terras vorming te koppelen aan bepaalde klimaat fasen.

Het andere onderzoeksgebied, de Gödöllő Hills, is het noordoostelijke deel van het glooiende heuvelachtige gebied tussen het omhoogkomende HMR en het dalende Great Hungarian Plain (GHP). Het dikke boven Mioceen-Plioceen sediment pakket maakte het mogelijk om een DEM gebaseerde morfometrische studie te combineren met een strukturele analyse gebaseerd op seismische reflectie profielen. Deze aanpak maakte het mogelijk om zowel de stijl als ouderdom van

de neotektonische vervorming van het Centraal Pannoonse Bekken te bepalen en het effect van de deformatie op de landschapsvorming in het Kwartair.

De morfotektonische analyse laat zien dat groot-schalige rechtlijnige fenomenen met een trend in NW-ZO richting landvormen zijn, die hun oorsprong hebben in deflatie processen. De twee ruggen, die geklassificeerd zijn als yardangs, met een windkanaal ertussen, zijn kennelijk gevormd door oppervlakte processen en de structuur speelde daarbij geen rol. Fluviale processen in het windkanaal waren gering, maar aan de lij zijde van de ruggen is löss gevormd, paleosol ontwikkeld en vond rivier insnijding plaats. De regionale scheef stelling van HMR in de richting naar GHP heeft ertoe geleid dat de richting van transport voornamelijk zuid-oost was. Een soortgelijke constellatie en orientatie als gevolg van de heersende noordwestelijke wind zou inzicht kunnen geven in een al eeuwenoud debat dat gevoerd wordt door Hongaarse aardwetenschappers over de rol van deflatie enerzijds en fluviale erosie anderzijds in de landschapsvorming van het gebied.

Verschillen in oppervlakte ruwheid en afwaterings netwerken zijn slechts gedeeltelijk toe te schrijven aan gedifferentieerde relatieve opheffing. Deflatie veroorzaakte substantiële denudatie van het oppervlak en vervlakking in het wind kanaal, terwijl fluviale insnijding het oppervlak op de ruggen opdeelde in stukken, waar verlaging van het oppervlak minder was. De ontwikkeling van afwaterings anomalieën, zoals afwijkingen van de consequente zuidoostelijke stroom richting, in de vorm van waterkeringen in de tussen gelegen dalen, rivier afbuigingen, radiale en centripetale afwaterings netwerken, zijn oppervlakte expressies van neotektonische vervorming van de boeven Mioceen-Pliocene strata. Inverse reactivering van vroegere afschuivingen en transpressie langs een vroegere transtensionale horizontaalverschuivingszone, de Tápió-Tóalmás Zone (TaTZ), zijn de oorzaak van een structurele plooiing van zelfs de bovenste waargenomen lagen.

Seismische reflectie profielen suggereren dat neotektonische inversie in het gebied begon in het vroeg Pliocene (~ 4 miljoen jaar geleden). Geometrie van het vervormings patroon is te verkaren door een druk spannings veld met een NO-ZW maximale horizontale spannings-as voor de neotektonische fase.

Voorgesteld wordt hier dat het NW-ZO wind kanaal van de Gödöllő Hills, het meest oostelijk gelegen onderdeel is van de in een waaiervormige Transdanubiaanse 'meridionale' netwerk van dalen. De in WZW-ONO richting afwijkende dalen, die het en echelon segment van de TaTZ (Alsó-Tápió, Kókai Creeks) volgen, worden beschouwd als de voortzetting van de 'meridionale' dalenstelsel en suggereert dat in de overgangszone zone tussen HMR en GHP groot-schalige landvormen zich ontwikkelden als gevolg van een gezamenlijk effect van plooit tektoniek én erosie door wind. Fluviale erosie prefereerde op de lij-zijde van de ruggen en stroom richtingen pasten zich aan aan de plooingspatronen van de ondiepe lagen.

Deze kwantitatieve morfotektonische studie suggereert dat er een aanzienlijke vertraging bestaat tussen het begin van de neotektonische fase tijdens het Pliocene (~ 4 miljoen jaar geleden) en de ontwikkeling van oppervlakte verschijnselen als reactie op de vervorming vanaf midden Pleistoceen tot heden. Het lijkt zeer waarschijnlijk dat gedurende laat Pliocene-vroeg Pleistoceen klimaat gecontroleerde denudatie voor een groot deel de oppervlakte expressies van vervorming teniet deed. Dit proces en de toename in verticale beweging naar het heden toe hebben ervoor gezorgd, dat denudatie niet langer gelijke tred houdt met de vervorming. Een verhoging van druk spanning in het inverterende centrale Pannoonse bekken, het accommodatie gebied tussen de convergeerverende Noordoostelijke en Westelijke eenheden van de de Pannoonse lithosfeer, kan de aanleiding hebben gegeven tot een versnelling van verticale bewegingen in het laatste deel van het Kwartair.

**A SZERKEZETI MOZGÁSOK ÉS A KLÍMA SZEREPE A PANNON-MEDENCE KÖZPONTI
RÉSZÉNEK NEGYEDIDŐSZAKI FELSZÍNFEJLŐDÉSÉBEN:
kvantitatív geomorfológiai, geokronológiai és szerkezetiföldtani elemzés**

ÖSSZEFOGLALÁS

A földfelszín formakincsét a szintkülönbségeket létrehozó szerkezeti mozgások és az ezek elegyengetésére törekvő, éghajlat-függő erózió kölcsönhatása alakítja ki. A felszínformák korának, a lepusztulás és a szerkezeti mozgások sebességének meghatározását lehetővé tevő módszerek rohamos fejlődése, valamint a felszínformák alakjának számszerű összehasonlíthatósága új fejezetet nyitottak a negyedidőszak kutatásában. E tanulmány több tudományág számszerűsítő és leíró módszereinek kombinálásával a negyedidőszaki felszínfejlődés megértését tűzte ki célul a Pannon-medence központi részében.

A Duna az egyetlen vízfolyás, amelynek bevágódása képes volt lépést tartani a Középhegység kiemelkedésével. A Duna völgye tehát egyedülálló lehetőséget nyújt a Középhegység kiemelkedési rátájának meghatározására, ami jó közelítéssel megegyezik a folyó bevágódásának ütemével.

A publikált teraszkrónológiai adatok összegzésével lehetséges volt a Duna völgy több szakaszán a bevágódási ráta megbecslése. A „hagyományos”, többnyire relatív krónológia és az új abszolút korok között előforduló ellentmondások feloldása a rendelkezésre álló adatokkal még nem lehetséges. A korábbi adatok alapján az elmúlt 350 ka során a bevágódás sebessége ~0,2 mm/év volt a Budai-hegység és a Gerece peremén, míg a Dunakanyarban, a Középhegység tengelyvonalában ~0,4 mm/év adódott. Ez utóbbi területen azonban nem álltak rendelkezésre megbízható krónológiai adatok, a „hagyományos” krónológia szinte kizárólag geomorfológiai megfigyelésekre alapoz.

A Dunakanyar fedetlen sziklateraszainak kitétségi kor meghatározása a litoszférában helyben keletkező, kozmogén ^3He izotóppal négyszer olyan gyors bevágódási rátát eredményezett, mint a korábbi adatsorok alapján végzett számítások. A teraszok kialakulását követően feltételezhetően bekövetkezett kismértékű lepusztulás figyelembe vételével a maximális bevágódási ráta 1,6 mm/év volt az elmúlt ~270 ka során. E ráta az Alpi hegységrendszer aktívan deformálódó területinek kiemelkedési sebességéhez hasonló, ám lényegesen elmarad az intenzíven deformálódó Himalája vagy a Nyugat-Csendes-óceáni térség kiemelkedéséről publikált adatoktól. A ^3He korok alapján a Dunakanyar kialakulása a középső-pleisztocénben kezdődhetett, tehát lényegesen később a „hagyományos” teraszkrónológia által sugallt kora-pleisztocén korszaknál. A Dunakanyar meredek topográfiája alacsony átlagmagassággal párosul a hasonló kiemelkedési rátájú területekhez képest. Ez a Pannon-medence központi részén a szerkezeti inverzió, és az ehhez köthető kiemelkedés fiatal korával, vagy az emelkedés egyre növekvő ütemével hozható összefüggésbe.

A folyók szakaszjellegének negyedidőszaki változásai az egyensúlyi állapot éghajlati és tektonikai okokra visszavezethető megbomlásának a következményei. A teraszkrónológiai adatok felbontása és pontossága egyelőre nem teszi lehetővé a teraszképződés egyes klimatikus fázisokhoz való kapcsolását.

A Gödöllői-dombság az emelkedő Középhegység és a süllyedő Alföld közötti dombsági térszín északkeleti tagja. Itt a vastag pannon-pliocén üledékes összlet lehetővé tette a DEM alapú morfometria és a szeizmikus szelvényeken alapuló szerkezetföldtani elemzés együttes alkalmazását. Ezúton sikerült meghatározni Pannon-medence központi részén a neotektonikai deformáció jellegét, hozzávetőleges idejét és jelentőségét a negyedidőszaki felszínfejlődésben.

A morfortektonikai elemzés szerint a térség ÉNY-DK-i irányú egyenes vonalú nagyformái nem szerkezeti, hanem deflációs eredetűek: a két vonulat két yardangnak tekinthető, melyeket egy szélcsonna választ el egymástól. A szélcsonnában a folyóvízi erózió jelentősége korlátozott volt, míg a szélárnyékos helyzetben levő vonulatok felszínalakulására több fázisú lösz- és paleotalaj-képződés, valamint folyóvízi felszabdálódás jellemző. A vízfolyások fő, DK-i irányát a Középhegység felől az Alföld felé történő szerkezeti eredetű dőlés határozta meg. A konzekvens DK-i irányú vízfolyások és az uralkodó ÉNy-i szél hasonló irányú deflációs formái magyarázhatják az évszázados vitát a folyóvízi- és a szélérózió jelentőségéről a térségben.

A felszínérdesség és völgyűrűség eltérései csak részben magyarázhatók a különböző mértékű kiemelkedés következményeként. A szélcsonnában a defláció általi nagymértékű areális lepusztulás és felszín elegyengetés történt, míg a vonulatokat a folyóvízi erózió erősen felszabdalta, de a felszín alacsonyodása csekélyebb mértékű lehetett. A völgyhálózat eltérései az uralkodó folyásiránytól (völgyi vízváltakozók, folyóeltérülések, radiális és centripetális rajzolattípusok) a pannon-pliocén rétegek fiatal deformációjára vezethetők vissza. A legfelső leképezett reflexiók szintjében is megfigyelt gyűrődést a korábbi normálvetők inverz felújulása, valamint a korábban transztenziós Tápió-Tóalmás eltolódási zóna (*TaTZ*) transzpressziós reaktivációja okozta.

A szeizmikus szelvények alapján a térség neotektonikai inverziója a kora-pliocénben kezdődhetett (~4 Ma). Az alakváltozás geometriája a neotektonikai fázis során kompressziós erőterre utal, ÉK-DNy maximális horizontális feszültségtengellyel.

E tanulmány szerint a Gödöllői-dombság ÉNy-DK-i irányú szélcsonnája a legyező alakban szétnyíló dunántúli „meridionális” völgyrendszer legkeletibb tagja. A NyDNy-KÉK-i irányú, az uralkodó folyásirányból eltérített és a *TaTZ* kulissza-szerűen rendeződött ágait követő völgyszakaszok (Alsó-Tápió, Kókai-ág) a „longitudinális” völgyhálózat legkeletibb tagjainak tekinthetők. A Gödöllői-dombságban végzett vizsgálatok alapján a „meridionális” völgyek kialakulása neotektonikus eredetű törésekkel nem összeegyeztethető. A középhegység és az Alföld közötti átmeneti zóna nagyformáinak létrehozásában a gyűrődéses tektonika és a szélérózió játszhatta fő szerepet. A folyóvízi erózió a vonulatok szélárnyékos felszínének felszabdálásában játszott fontos szerepet, ahol a lefolyási irányok igazodtak a felszínalatti rétegek felboltozódásaihoz.

E kvantitatív morfortektonikai elemzés alapján jelentős késés figyelhető meg a neotektonikai deformáció kezdete (~4 Ma) és az ehhez köthető felszínformák középső-pleisztocénben meginduló kialakulása között. Feltehetőleg a késő-pliocén - kora-pleisztocén során végbemenő denudáció lépést tartott a szerkezeti mozgásokkal. A középső-pleisztocéntól felerősödő klímaromlási folyamat eredményeként az eróziós folyamatok megváltozhattak, és a lepusztulás már nem volt képes az egyre jelentősebb deformáció felszíni megnyilvánulásait eltüntetni. A függőleges kéregmozgások feltételezhető felgyorsulását a Pannon-medence központi részében a neotektonikai fázis során egymáshoz közeledő Északkeleti és Nyugati Egységek közötti térség rövidülése okozhatja.